

*Technical Paper***Analisis Pindah Panas pada Pipa Utama Sistem Hidroponik dengan Pendinginan Larutan Nutrisi***Heat Transfer Analysis in The Main Pipe of Hydroponic System with Nutrient Solution Cooling*

Nurul Choerunnisa, Departemen Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor,
Email: choerunnisa_nurul@yahoo.com

Herry Suhardiyanto, Departemen Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor,
Email: herrysto@yahoo.com

Abstract

In a hydroponic culture with root zone cooling system, the temperature of cooled nutrient solution rises during distribution to the root zone of the plants. The aims of the research were to analyze the heat transfer from environment to nutrient solution in the main pipe of irrigation for hydroponic system, to validate the heat transfer model, and to develop a guidance to determine the inlet temperature for nutrient solution cooling. Mathematical model for heat transfer in the pipe was developed from heat transfer and fluid flow equations. Temperature of nutrient solution at the inlet position in the main distribution pipe was calculated by using validated heat transfer model. Validation of heat transfer model was done to compare the calculated temperature of nutrient solution with that of measured temperature. The results of heat transfer model validation showed that the heat transfer model is accurate to predict the temperature of nutrient solution in the main pipe. Therefore, the heat transfer model has been used to develop a guidance to determine inlet temperature of nutrient solution for certain condition of thermal environment and expected outlet temperature of nutrient solution.

Keywords: heat transfer analysis, nutrient solution cooling, main pipe, substrate hydroponic system

Abstrak

Dalam kultur hidroponik dengan sistem pendinginan terbatas, suhu larutan nutrisi mengalami kenaikan selama didistribusikan menuju zona perakaran tanaman. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis pindah panas pada pipa utama sistem hidroponik, melakukan validasi terhadap model pindah panas tersebut, dan mengembangkan panduan untuk menentukan suhu dalam pendinginan larutan nutrisi pada posisi inlet. Model matematika untuk pindah panas dalam pipa tersebut dikembangkan dari persamaan-persamaan pindah panas dan aliran fluida. Suhu dari larutan nutrisi pada posisi inlet dari pipa distribusi utama dihitung dengan menggunakan model pindah panas yang telah divalidasi. Validasi model pindah panas dilakukan untuk membandingkan suhu larutan nutrisi hasil perhitungan dengan hasil pengukuran. Hasil validasi dari model pindah panas menunjukkan bahwa model pindah panas akurat untuk memprediksi suhu larutan nutrisi di dalam pipa utama. Oleh karena itu, model pindah panas tersebut digunakan untuk mengembangkan panduan dalam menentukan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet untuk kondisi lingkungan tertentu dan suhu larutan nutrisi posisi outlet.

Kata kunci: analisis pindah panas, pendinginan larutan nutrisi, pipa utama, sistem hidroponik substrat

Diterima: 09 Oktober 2014; Disetujui: 07 Januari 2015

Pendahuluan

Kondisi lingkungan merupakan aspek yang sangat penting dalam budidaya tanaman. Lingkungan harus dijaga agar berada atau mendekati kondisi optimum bagi tanaman yang dibudidayakan. Penggunaan rumah tanaman dan

hidroponik merupakan salah satu metode budidaya tanaman dalam lingkungan yang terkendali (Suhardiyanto 2009). Teknologi ini memungkinkan produksi secara lebih terencana, baik dari segi kuantitas, kualitas, maupun waktu panen.

Indonesia termasuk ke dalam kawasan tropika basah yang menerima radiasi matahari sangat

tinggi. Radiasi matahari yang tinggi menyebabkan suhu di dalam rumah tanaman juga menjadi tinggi. Tingginya suhu udara di dalam rumah tanaman dapat mencapai tingkat yang dapat memicu *stress* pada tanaman (Suhardiyanto 2009). Menurut Kozai et al. (1985) dalam Suhardiyanto (2009), pengendalian suhu udara di dalam rumah tanaman secara mekanik membutuhkan energi yang sangat besar.

Sejak tahun 1990-an, telah dikembangkan sistem pendinginan terbatas (*zone cooling*) dimana pendinginan tidak dilakukan terhadap keseluruhan volume udara di dalam rumah tanaman, melainkan terhadap daerah sekitar tanaman yang paling membutuhkan (Suhardiyanto 2009). Dalam budidaya tanaman secara hidroponik, pendinginan larutan nutrisi lebih tepat dibandingkan dengan pendinginan udara. Panas jenis air lebih tinggi daripada udara sehingga larutan yang didinginkan akan bertahan pada suhu rendah lebih lama dibandingkan dengan udara (Suhardiyanto et al. 2007).

Sistem pendinginan terbatas di daerah tropika basah belum banyak dikembangkan. Beberapa pengembangan sistem pendinginan terbatas di daerah tropika basah yang telah dilakukan, yaitu pengembangan sistem pendinginan terbatas daerah perakaran secara NFT (*Nutrient Film Technique*) untuk tanaman selada (Chadiri 1991) dan tomat (Cipta 2007), serta pendinginan terbatas daerah perakaran secara aeroponik untuk tanaman selada (He et al. 2001; Jie and Kong 1998) dan kentang (Sumarni 2013).

Kajian analisis termal telah dilakukan terhadap beberapa sistem pendinginan terbatas dengan pendinginan larutan nutrisi. Randiniaty (2007) melakukan analisis termal untuk memprediksi distribusi suhu larutan nutrisi pada bedeng tanaman dalam sistem NFT. Suhardiyanto et al. (2007) melakukan analisis pindah panas pada pipa vertikal yang mengalirkan air dari tangki yang dipendam dalam tanah untuk mendinginkan larutan nutrisi menuju pipa utama irigasi. Sumarni et al. (2013) melakukan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk memprediksi sebaran suhu di *chamber* pada sistem aeroponik yang didinginkan dengan larutan nutrisi yang disemprotkan melalui *nozzel* (Sumarni et al. 2013). Dalam kajian analisis termal yang dilakukan di atas, sifat fisik larutan nutrisi diasumsikan sama dengan air.

Analisis pindah panas dari lingkungan menuju larutan nutrisi yang mengalir di dalam pipa utama dalam sistem hidroponik substrat perlu dilakukan sebagai dasar perencanaan pendinginan terbatas daerah perakaran. Prinsip-prinsip pindah panas dan mekanika fluida digunakan untuk memprediksi suhu larutan nutrisi selama dialirkan di dalam pipa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis pindah panas pada pipa utama sistem hidroponik substrat dengan pendinginan larutan nutrisi, melakukan validasi model pindah panas melalui

perbandingan hasil pengukuran dan perhitungan, dan mengembangkan panduan dalam menentukan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan di rumah tanaman tipe *modified standard peak* Laboratorium Lapangan Siswadhi Soepardjo, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Rumah tanaman berukuran 6 m x 12 m yang dibangun membujur ke arah utara-selatan. Dindingnya terbuat dari kawat kassa dengan mesh 1 mm². Lokasi penelitian berada di dataran rendah dengan ketinggian 250 dpl. Pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Juni–Agustus 2013.

Bahan dan Alat

Bahan dan alat yang digunakan meliputi air sebagai pengganti larutan nutrisi, sistem pendinginan larutan nutrisi, sistem irigasi tetes, dan sistem akuisisi data. Sistem pendinginan larutan nutrisi meliputi pendingin Elitech tipe STC 8080H dan pompa celup Wasser tipe WD 101 dengan kapasitas maksimal 70 liter menit⁻¹ dan *total head* 6 m. Sistem irigasi tetes meliputi bak penampung larutan nutrisi, pompa listrik Panasonic GA 130JAK (kapasitas 32 liter menit⁻¹, daya hisap 9 m, daya dorong 18 meter, dan daya listrik 125 W), pipa utama dari PVC ukuran ¾ inch, pipa lateral, dan *emitter*. Alat ukur yang digunakan meliputi termometer bola basah bola kering, termokopel dan *hybrid recorder* Yokogawa tipe MV Advance 1000, *weather station* Vantage Pro 2, dan *flow meter* Inline tipe panel.

Prosedur Pengambilan Data

Pengukuran dilakukan terhadap pipa utama yang merupakan bagian dari sistem irigasi tetes. Pipa utama yang digunakan adalah pipa PVC berukuran ¾ inch dengan panjang 5 meter. Insulasi yang digunakan adalah busa yang telah diukur konduktivitas termalnya dengan menggunakan *thermal conductivity meter*. Konduktivitas termal dari pipa PVC menurut Harper (2006) berada pada kisaran 0.14–0.19 W m⁻¹ K⁻¹. Pengukuran dilakukan mulai dari titik 0 meter hingga titik 5 m pipa utama dengan jarak antar titik sebesar 1 m sehingga terdapat 6 titik di sepanjang pipa utama. Titik pengukuran dinyatakan sebagai jarak relatif terhadap ujung hilir pipa ($x/L = 1.0$), dimana x adalah jarak titik pengukuran terhadap hilir pipa (m) dan L adalah panjang pipa utama (m). Pada setiap titik diukur suhu larutan nutrisi, suhu dinding dalam pipa, suhu dinding luar pipa, dan suhu bagian luar insulasi. Debit air diukur ketika air masuk dan keluar dari pipa utama dengan menggunakan *flow meter*.

Pengukuran dilakukan pada pukul 7.00 – 17.00 pada tanggal 19 Agustus 2013. Pengambilan data

dilakukan setiap 30 menit. Suhu input larutan nutrisi berkisar antara 8 - 25 °C. Besarnya debit diatur dengan menggunakan katup yang dipasang sebelum pipa utama. Suhu udara, kelembaban udara, dan radiasi matahari diukur sepanjang hari.

Analisis Pindah Panas

Analisis pindah panas dilakukan terhadap aliran air yang melalui pipa utama. Dalam penelitian ini diambil beberapa asumsi, yaitu: (1) sifat fisik larutan nutrisi dianggap sama dengan air; (2) perpindahan panas yang terjadi hanya melalui proses konveksi dan konduksi dengan batas sistem adalah dinding paling luar saluran larutan nutrisi; dan (3) perpindahan panas terjadi pada satu dimensi ke arah radial dalam keadaan *steady*.

Aliran kalor menyeluruh sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi pada kondisi *steady* akan menghasilkan suatu tahanan termal (Çengel dan Turner 2011). Persamaan total tahanan termal tersebut adalah sebagai berikut:

$$R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o \quad (1)$$

dimana R_i adalah tahanan termal karena pindah panas secara konveksi antara fluida di dalam saluran dan dinding saluran bagian dalam (W^{-1}), R_{wall} adalah tahanan panas dari dinding saluran (W^{-1}), dan R_o adalah tahanan panas karena pindah panas secara konveksi antara dinding saluran bagian luar dan fluida di luar saluran (W^{-1}).

Dalam penelitian ini, sistem dibatasi sampai dengan permukaan insulasi. Oleh karena itu diadakan pengukuran di permukaan tersebut. Apabila pipa utama akan diberi insulasi, maka R_{wall} terdiri dari tahanan termal dari dinding pipa dan dinding insulasi sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut:

$$R_{total} = \frac{1}{hA_1} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi k_p L} + \frac{\ln(D_3/D_2)}{2\pi k_i L} \quad (2)$$

dimana $A_1 = \pi D_1 L$, h adalah koefisien pindah panas konveksi ($W m^{-2} K^{-1}$), k_p adalah konduktivitas termal pipa ($W m^{-1} K^{-1}$), k_i adalah konduktivitas termal bahan insulasi ($W m^{-1} K^{-1}$), L adalah panjang pipa (m), D_1 adalah diameter pipa bagian dalam (m), D_2 adalah diameter pipa bagian luar (m), dan D_3 adalah diameter pipa ditambah dengan insulasi (m).

Laju perpindahan panas kemudian dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = U A \Delta T \quad (3)$$

dimana U adalah *overall heat transfer coefficient* yang satuannya $W m^{-2}$ (Çengel, 2011), ΔT adalah perbedaan suhu menyeluruh (K), dan A adalah luas penampang benda yang tegak lurus terhadap aliran panas (m^2). Dengan demikian, *overall heat transfer coefficient* (U) dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$U = \frac{1}{\frac{A_3}{hA_1} + \frac{A_3 \ln(D_2/D_1)}{2\pi k_p L} + \frac{A_3 \ln(D_3/D_2)}{2\pi k_i L}} \quad (4)$$

Bilangan Reynold perlu diketahui untuk menentukan jenis aliran suatu fluida. Bilangan Reynold (Re) dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (5)$$

dimana ρ adalah massa jenis fluida ($kg m^{-3}$), V adalah kecepatan aliran fluida ($m s^{-1}$), D_h adalah diameter hidrolis (m), dan μ adalah viskositas dinamik fluida ($kg m^{-1} s^{-1}$).

Hukum pertama termodinamika secara sederhana dapat ditulis sebagai berikut:

$$Q_{in} - Q_{out} = Q_{stored} \quad (6)$$

dimana Q_{in} adalah jumlah panas yang masuk ke dalam sistem (Watt) dan Q_{out} adalah jumlah panas yang keluar dari dalam sistem (Watt).

Panas yang disimpan oleh air selama mengalir dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (7)$$

dimana \dot{m} adalah laju aliran massa ($kg s^{-1}$) dan C_p adalah kalor jenis ($J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$). Dengan demikian, persamaan di atas dapat dikembangkan menjadi (Holman, 2009):

$$\dot{m} C_p (T_o' - T_i) = U A \left(\frac{(T_d - T_n) - (T_d - T_o')}{\ln \left(\frac{T_d - T_i}{T_d - T_o'} \right)} \right) \quad (8)$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$T_o' = T_d - \left(\frac{T_d - T_n}{\exp \left(\frac{U A}{\dot{m} C_p} \right)} \right) \quad (9)$$

dimana T_o' adalah suhu larutan nutrisi yang keluar dari pipa utama hasil perhitungan ($^\circ C$), T_d adalah suhu dinding pipa utama atau insulasi bagian luar ($^\circ C$), dan T_n adalah suhu larutan nutrisi ($^\circ C$).

Menurut Kreith (2010), untuk aliran di dalam pipa atau saluran yang panjang, panjang-penting dalam bilangan *Nusselt* (Nu) adalah garis tengah atau hidrolisnya atau D_h , yang berdefinisi:

$$D_h = 4 \frac{\text{Luas penampang aliran}}{\text{Keliling basah}} \quad (10)$$

Tabel 1. Ikhtisar persamaan-persamaan yang digunakan dalam perpindahan panas konveksi paksa di dalam saluran

Sistem	Persamaan	
Pipa panjang ($L/D > 20$) Aliran laminar ($Re < 2100$)	$Nu = 1.86 (Re Pr DH/L)^{0.33} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$ Pemanasan cairan $\mu_b/\mu_s = 0.36$ Pendinginan cairan $\mu_b/\mu_s = 0.20$	(13)
Pipa pendek ($L/D < 20$) Aliran laminar ($Re < 2100$)	$Nu = Re Pr DH/(4L) \ln (1 - (2.6(Pr^{0.167}(Re Pr DH/L)^{0.5}))^{-1})$	(14)
Pipa panjang ($L/D > 20$) Aliran turbulen ($Re > 2100$)	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$	(15)
Pipa pendek ($L/D < 20$) Aliran turbulen ($Re > 2100$)	$Nu = 0.023 (1 + DH/L)^{0.7} Re^{0.8} Pr^{0.33}$	(16)

^aSumber: (Kreith 2010)

Luas penampang aliran pipa adalah $\frac{\pi D^2}{4}$ dan keliling basah (wetted perimeter) adalah πD . Oleh karena itu, garis tengah dalam pipa sama dengan garis tengah hidroliknya. Dengan demikian, D_h dapat dihitung dengan persamaan:

$$D_h = 4 \frac{(\pi/4)(D_{out}^2 - D_i^2)}{\pi(D_i - D_{out})} = D_{out} - D_i \quad (11)$$

dimana D_i adalah diameter pipa bagian dalam (m) dan D_{out} adalah diameter pipa bagian luar (m).

Koefisien konveksi antara dinding pipa dan air ditentukan berdasarkan persamaan:

$$h = \frac{k_a Nu}{D_h} \quad (12)$$

dimana k_a adalah konduktivitas termal air ($W m^{-1} ^\circ C^{-1}$).

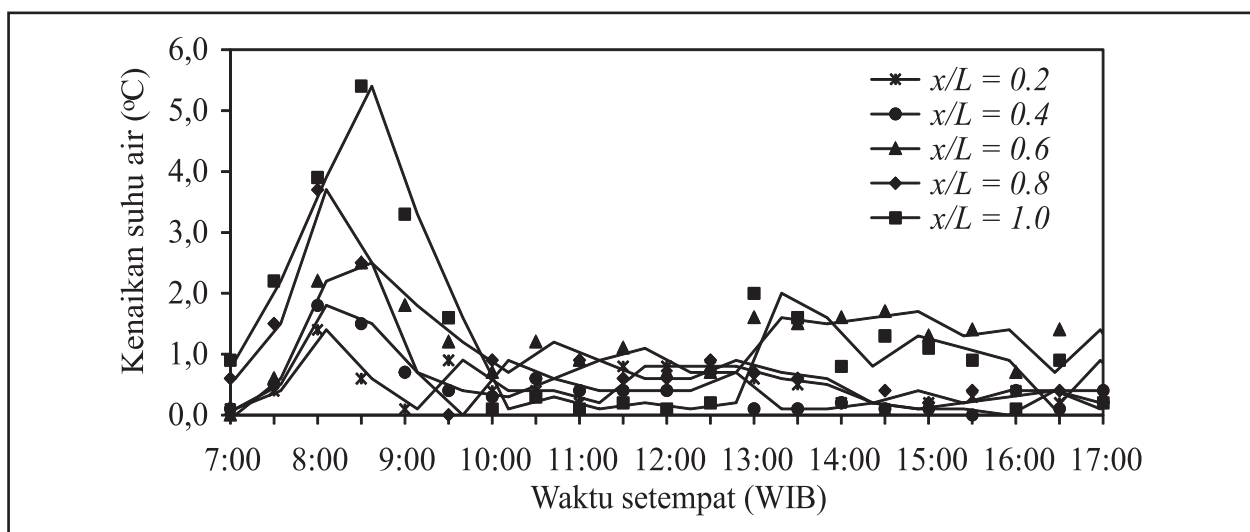
Nilai Nu diperoleh dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada Tabel 1. Persamaan yang digunakan untuk menghitung Nu tergantung dari bilangan Reynold dan perbandingan L/D_h . Nilai

V_s , K_a , C_p , μ , dan Pr dari air diperoleh dari tabel *Properties of saturated water* (Çengel dan Turner 2011).

Hasil dan Pembahasan

Perubahan Suhu Air di dalam Pipa

Data pengukuran yang diolah adalah data pengukuran pada hari cerah pada tanggal 19 Agustus 2013. Radiasi matahari tertinggi terjadi pada pukul 13.00 WIB yaitu $912 W m^{-2}$ dan menjadi nol pada pukul 18.00 WIB. Suhu udara di dalam rumah tanaman tertinggi terjadi pada pukul 13.30 WIB yaitu $35.5 ^\circ C$ dan suhu udara di luar rumah tanaman tertinggi terjadi pada pukul 14.30 WIB yaitu $33.5 ^\circ C$. Perbedaan waktu tercapainya suhu udara maksimum di dalam dan di luar rumah tanaman ini disebabkan karena kelembaban udara di dalam rumah tanaman pada pukul 13.00-14.30 WIB konstan dan lebih tinggi (81%) jika dibandingkan



Gambar 1. Kenaikan suhu air di sepanjang pipa utama sistem hidroponik (19 Agustus 2013)

Tabel 2. Gradien dan intersep garis regresi linier antara suhu air hasil perhitungan dan hasil pengukuran serta koefisien determinasinya.

No	x/L	Gradien	Intersep	Koefisien determinasi
1	0.2	1.0127	-0.0432	0.9781
2	0.4	1.0199	-0.2642	0.9764
3	0.6	0.9724	-0.5486	0.9706
4	0.8	1.0258	-0.2770	0.9363
5	1.0	0.9215	0.0404	0.8098
6	Keseluruhan	0.9668	0.0893	0.9114

kelembaban udara di luar rumah tanaman yang menurun dan lebih rendah (55-44%). Suhu udara di dalam rumah tanaman rata-rata lebih tinggi 2 °C daripada suhu udara di luar rumah tanaman.

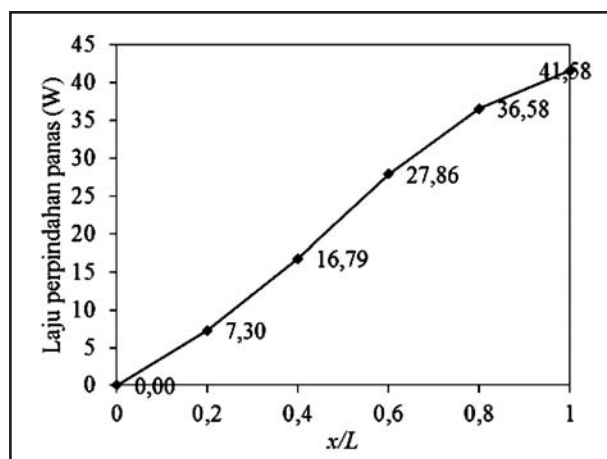
Air yang dialirkan di dalam pipa utama sistem hidroponik mengalami kenaikan suhu yang terjadi akibat proses pindah panas dari lingkungan menuju air. Faktor lingkungan yang mempengaruhi proses pindah panas tersebut adalah udara di dalam rumah tanaman dan lantai rumah tanaman. Kenaikan suhu rata-rata pada $x/L = 0.2$ adalah 0.40 °C, pada $x/L = 0.4$ adalah 0.42 °C, pada $x/L = 0.6$ adalah 0.54 °C, pada $x/L = 0.8$ adalah 0.64 °C, dan pada $x/L = 1.0$ adalah 1.25 °C. Dari pukul 06.00 WIB sampai pukul 08.00 WIB terjadi kenaikan suhu yang cukup nyata pada setiap titik pengukuran. Baik suhu maupun kelembaban udara di dalam rumah tanaman juga mengalami kenaikan yang cukup nyata. Namun, kenaikan suhu dan kelembaban ini tidak merata di dalam rumah tanaman. Titik pengukuran $x/L = 1.0$ merupakan titik pengukuran dengan rata-rata kenaikan suhu air yang paling tinggi karena posisinya berada di timur sehingga menerima radiasi matahari lebih besar daripada bagian lain di dalam rumah tanaman. Kenaikan suhu air dapat dilihat pada Gambar 1.

Laju Perpindahan Panas di Sepanjang Pipa Utama

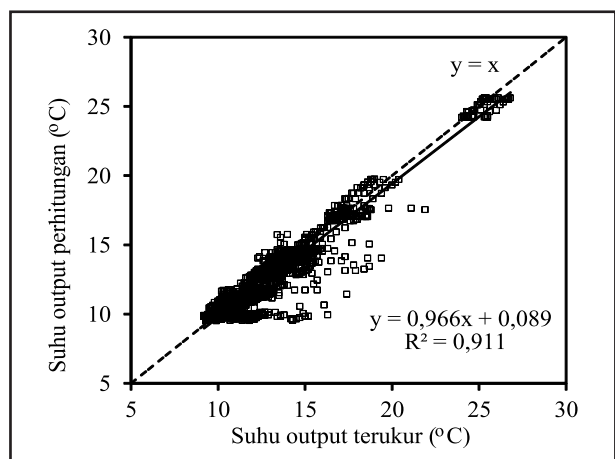
Hasil perhitungan laju perpindahan panas di sepanjang pipa ditunjukkan pada Gambar 2. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa laju perpindahan panas semakin meningkat dari $x/L = 0.2$ ke $x/L = 1.0$ yaitu 7.30-41.58 W. Hal ini disebabkan karena tahanan termal yang semakin menurun seiring dengan meningkatnya panjang pipa yang dilalui aliran air. Laju perpindahan panas ini diukur pada debit aliran sebesar 0.00025 m³ s⁻¹. Debit aliran larutan nutrisi sebelum dan sesudah memasuki pipa utama besarnya sama sehingga dapat dipastikan tidak terjadi penurunan tekanan. Penurunan tekanan sebetulnya selalu terjadi dalam setiap aliran fluida di dalam pipa. Karena nilai penurunan tekanan ini sangat kecil dan penurunan tekanan dapat diabaikan, aliran dianggap *steady*.

Validasi Model Pindah Panas

Validasi model pindah panas pada penelitian ini dilakukan dengan metode analisis regresi linier. Suhu air hasil prediksi dan hasil pengukuran diplot untuk mendapatkan hubungan linier antara kedua variabel tersebut. Kemudian, garis linier yang terbentuk dibandingkan dengan garis $y = x$. Prediksi suhu air semakin akurat jika garis linier tersebut semakin mendekati garis $y = x$ atau nilai gradien dari



Gambar 2. Laju perpindahan panas di sepanjang pipa utama sistem hidroponik (19 Agustus 2013)



Gambar 3. Plot data suhu air pada posisi outlet hasil perhitungan dengan hasil pengukuran keseluruhan.

Tabel 3. Input data untuk penentuan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet pipa.

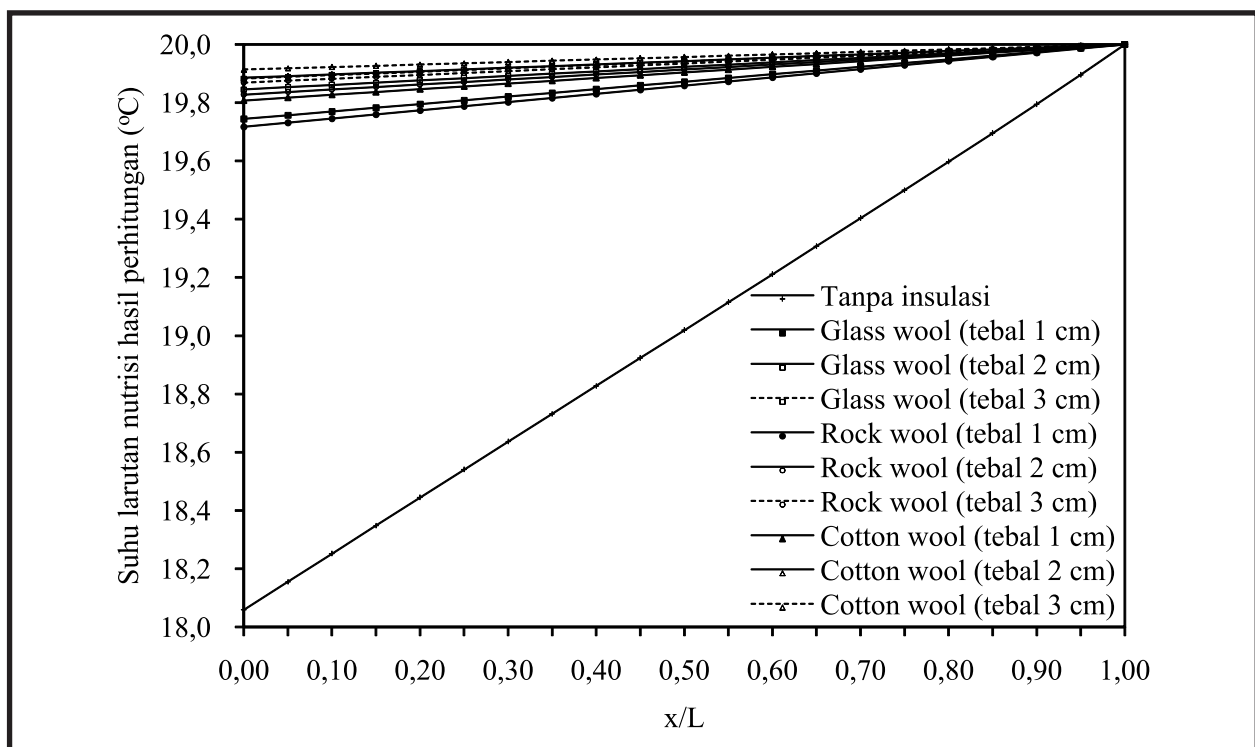
Input data	Lambang	Satuan	Nilai
Suhu output larutan nutrisi	T_o	$^{\circ}\text{C}$	20
Debit	Q	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	0.000163
Suhu dinding	T_d	$^{\circ}\text{C}$	33
Panjang total pipa	L	m	20
Diameter dalam pipa	D_1	m	0.022
Diameter luar pipa	D_2	m	0.026
Tebal insulasi	T	m	0.01-0.03
Konduktivitas termal pipa (PVC 3/4 inch)	k_p	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.16
Konduktivitas termal insulasi bahan <i>glass wool</i>	k_i	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.040
Konduktivitas termal insulasi bahan <i>rock wool</i>	k_i	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.045
Konduktivitas termal insulasi bahan <i>cotton wool</i>	k_i	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.029

persamaan regresi linier tersebut mendekati satu sedangkan intersepnya mendekati nol. Koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan dapat digunakan untuk menunjukkan tingkat keeratan korelasi antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran. Nilai maksimum R^2 adalah 1.

Validasi model pindah panas dilakukan pada $x/L = 0.2$ hingga $x/L = 1.0$. Plot data hasil perhitungan dan hasil pengukuran suhu air dan garis regresi linier yang dihasilkan untuk keseluruhan posisi pada pipa utama dapat dilihat pada Gambar 3 dan ikhtisar garis regresi linier per titik serta keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 2. Secara umum, gradien garis regresi yang diperoleh mendekati satu dan intersepnya mendekati nol. Koefisien determinasi

yang dihasilkan juga mendekati 1. Hal ini menunjukkan bahwa model pindah panas yang dikembangkan akurat dalam memprediksi suhu air yang keluar dari pipa utama. Model tersebut dapat digunakan untuk perencanaan sistem pendinginan larutan nutrisi untuk hidroponik substrat.

Tabel 2 menunjukkan bahwa koefisien determinasi cenderung semakin menurun ketika jarak titik pengukuran dari posisi inlet aliran air semakin jauh. Hal ini dapat disebabkan karena nilai konduktivitas termal dari pipa PVC yang diambil dari literatur lebih rendah daripada nilai konduktivitas termal pipa PVC yang digunakan pada saat penelitian. Selain itu, adanya bagian pipa yang tidak tertutup insulasi dengan sempurna terutama pada



Gambar 4. Penentuan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet yang dibutuhkan untuk mendapatkan suhu larutan nutrisi pada posisi outlet 20°C

bagian sambungan insulasi sehingga pindah panas yang terjadi lebih besar daripada yang seharusnya juga dapat menjadi penyebab terjadinya hal tersebut.

Penentuan Suhu Larutan Nutrisi pada Posisi Inlet

Model pindah panas digunakan untuk perencanaan pendinginan terhadap larutan nutrisi agar pada posisi outlet pipa utama diperoleh suhu output yang optimum bagi tanaman. Tanaman yang akan digunakan sebagai contoh adalah tanaman kentang. Menurut Hancock *et al.* (2013), suhu siang hari yang optimum bagi produktivitas tanaman kentang berada pada kisaran 14-22°C. Suhu larutan nutrisi pada posisi outlet dari pipa utama ditentukan dari kisaran suhu optimum tersebut yaitu 20°C. Suhu dinding pipa ditentukan berdasarkan suhu rata-rata dinding pipa selama pengukuran pada tanggal 19 Agustus 2013, yaitu sebesar 33°C. Pada perancangan ini digunakan pipa PVC berdiameter $\frac{3}{4}$ inch yang biasa digunakan sebagai pipa utama pada sistem irigasi untuk hidroponik. Debit aliran larutan nutrisi untuk perancangan ditetapkan 0.163 liter detik⁻¹ per 100 m² karena menurut Muro dan Lamsfus (1997) aplikasi penggunaan air untuk irigasi tetes pada rumah tanaman berada pada kisaran 0.068-0.163 liter detik⁻¹ per 100 m². Rumah tanaman yang digunakan untuk budidaya tanaman kentang diasumsikan memiliki luas 100 m² sehingga debitnya menjadi 0.163 liter detik⁻¹. Panjang pipa utama ditentukan sebesar 20 m. Berdasarkan asumsi dan dimensi rancangan sistem hidroponik dengan pendinginan larutan nutrisi tersebut kemudian dilakukan penentuan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet dari pipa utama sistem hidroponik. Rincian data input untuk perancangan ditunjukkan pada Tabel 3.

Sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4, untuk memperoleh suhu 20°C pada jarak 20 meter diperlukan suhu 18.059°C tanpa insulasi. Jika diberi insulasi, suhu larutan nutrisi pada posisi inlet dapat lebih tinggi daripada pada pipa yang tidak diberi insulasi sehingga tidak perlu didinginkan sampai suhu yang terlalu rendah. Suhu larutan nutrisi di sepanjang pipa yang diberi insulasi akan lebih seragam sehingga seluruh tanaman kentang di sepanjang pipa utama dapat memperoleh suhu yang lebih seragam.

Untuk mencapai suhu larutan nutrisi 20°C pada posisi outlet dari pipa 20 m insulasi *glass wool* dengan ketebalan 1, 2, dan 3 cm, *rock wool* dengan ketebalan 1, 2, dan 3 cm, serta *cotton wool* dengan ketebalan 1, 2, dan 3 cm maka suhu larutan nutrisi pada posisi inlet masing-masing adalah 19.74, 19.85, dan 19.88°C, 19.72, 19.83, dan 19.87°C, serta 19.81, 19.89, dan 19.91°C. Dapat dilihat bahwa semakin tebal insulasi semakin kecil perpindahan panas yang terjadi dan semakin kecil kenaikan suhu atau semakin seragam. Akan tetapi penambahan

ketebalan ini menimbulkan konsekuensi teknis dan biaya. Hal ini karena menurut Cengel dan Turner (2011), ketebalan insulasi memang akan meningkatkan resistansi termal konduksi dari bahan insulasi namun semakin tebal insulasi tahanan termal konveksi akan menurun karena luas permukaan bagian luar insulasi semakin besar yang menyebabkan perpindahan panas secara konveksi juga semakin tinggi.

Simpulan

Berdasarkan analisis pindah panas diketahui bahwa perubahan suhu air di sepanjang pipa bervariasi yaitu antara 0.21-0.25°C dengan rata-rata laju perpindahan panas bervariasi yaitu antara 7.30 W sampai 41.58 W. Hasil validasi menunjukkan bahwa model pindah panas yang dikembangkan dapat digunakan untuk memprediksi suhu air pada posisi outlet dari pipa utama sebelum masuk ke dalam pipa lateral pada jaringan irigasi tetes untuk hidroponik substrat di dalam rumah tanaman. Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk mendapatkan suhu larutan nutrisi 20°C pada posisi outlet dari pipa utama berbahan PVC ukuran $\frac{3}{4}$ inch tanpa insulasi dengan panjang pipa 20 m maka suhu larutan nutrisi pada posisi outlet harus 18.06°C. Suhu larutan nutrisi pada posisi inlet dapat lebih tinggi dengan menggunakan insulasi sehingga mengurangi beban pendinginan. Pipa utama sistem hidroponik dengan pendinginan larutan nutrisi sebaiknya diberi insulasi yang tepat dengan ketebalan yang optimum agar suhu di sepanjang pipa seragam.

Daftar Pustaka

- Çengel, Y.A., R.H. Turner. 2011. *Fundamentals of Thermal Fluid Sciences*. 4th Ed. McGraw-Hill Company, Inc. New York.
- Cipta, S.W. 2007. Pendinginan siang/malam (*day/night cooling*) larutan nutrisi pada budidaya tanaman tomat (*Lycopersicum esculentum* Mill) menggunakan sistem NFT di dalam rumah kaca. (Skripsi). Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.
- Chadiri, Y. 1991. Pendinginan larutan tanaman selada sistem NFT. (Skripsi). Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.
- Hancock, R.D, W.L. Morris, L.J.M. Ducreux, J.A. Morris, M. Usman, S.R. Verral, J. Fuller, C.G. Simpson, R. Zhang, P.E. Hedley and M.A. Taylor. 2013. Physiological, biochemical and molecular responses of the potato (*Solanum tuberosum* L.) plant to moderately elevated temperature. *Plant, Cell and Environment*. Vol. 37(2): 439-450.
- Harper, C. 2006. *Handbook of Plastics Technologies*. McGraw-Hill Company, Inc. New York.

- He, J., S.K. Lee, and I.C. Dodd. 2001. Limitation to photosynthesis of lettuce grown under tropical condition: Alleviation by root-zone cooling. *Journal of Experimental Botany*. Vol 52: 359: 1323-1330.
- Holman, J.P. 2009. *Heat Transfer*. 10th Ed. McGraw-Hill Company, Inc. New York.
- Jie, H., L.S. Kong. 1998. Growth and photosynthetic characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under fluctuating hot ambient temperatures with the manipulation of cool root-zone temperature. *Plant Physiol. W*, L152: 387-391.
- Kreith, F., M.S. Bohn. 2010. *Principles of Heat Transfer*. 7th Ed. Brookscole. New York.
- Muro, J.V.D.G., C. Lamsfus. 1997. Comparison of hydroponic culture and culture in a peat/san mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. *Potato Research*. Vol. 40(4): 431-440.
- Randiniaty, Y. 2007. Analisis termal pendinginan siang/malam (*day/night cooling*) larutan nutrisi pada budidaya tanaman tomat (*Lycopersicon esculentum Mill*) dengan sistem *nutrient film technique (NFT)*. (Skripsi). Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.
- Suhardiyanto, H. 2009. *Teknologi Rumah Tanaman untuk Iklim Tropika Basah: Pemodelan dan Pengendalian Lingkungan*. IPB Press. Bogor.
- Suhardiyanto, H., M.M. Fuadi dan Y. Widaningrum. 2007. Analisis pindah panas pada pendinginan dalam tanah untuk sistem hidroponik. *Jurnal Keteknikan Pertanian* Vol.21 (4): 355-362.
- Sumarni, E. 2013. Pengembangan *zone cooling system* untuk produksi benih kentang secara aeroponik di dataran rendah tropika basah. (Disertasi). Sekolah Pascasarjana, IPB. Bogor.
- Sumarni, E. H. Suhardiyanto, K.B. Seminar, S.K. Saptomo. 2013. Temperature distribution in aeroponics system with root zone cooling for the production of potato seed in tropical lowland. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Vol. 4 (6): 779-784.